

Time reverse modeling of acoustic emissions in structural concrete

Doctoral Thesis

Author(s):

Kocur, Georg Karl

Publication date:

2012

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007319340>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 20368

**TIME REVERSE MODELING OF
ACOUSTIC EMISSIONS IN STRUCTURAL CONCRETE**

A dissertation submitted to

ETH Zurich

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

GEORG KARL KOCUR

Diplom-Ingenieur, University of Wuppertal

born 19th December 1977

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Thomas Vogel (ETH Zurich, Examiner)

Prof. Dr. Christian Große (TU Munich, Co-examiner)

PD Dr. Erik H. Saenger (ETH Zurich / FU Berlin, Co-examiner)

2012

Abstract

Acoustic emission (AE) is caused by the release of stored strain energy due to an irreversible deformation process or internal friction. The released energy induces elastic waves that propagate inside the structure. The emitted waves can be recorded at the surface of the structure by piezoelectric sensors and converted into acoustic signals. A convenient application of AE analysis in structural engineering is the localization of concrete cracking and reinforcement ruptures. However, for progressed crack patterns, common localization procedures fail, because the waves that are recorded by the sensors have either been reflected repeatedly, experienced interference with other waves or are very weak. Therefore, in this dissertation a new method of AE analysis is developed, which is based on a different physical principle from that of existing methods and which takes advantage of the wave field interferences.

The present work aims at establishing a novel localization method, which is based on wave propagation and is called time reverse modeling (TRM). TRM has recently been used in the area of exploration geophysics. In this dissertation, it is applied for signal-based AE analysis of reinforced concrete (RC) specimens. TRM uses signals obtained from physical experiments as input, such as those recorded by piezoelectric sensors. The signals are re-emitted numerically into a structure in a time-reversed manner. In the so-called inverse simulation, the wavefronts interfere and appear as dominant concentrations of energy at their origins, which marks the source of the AE. A numerical concrete model with constituents randomly distributed in space is established to represent the propagation behavior of concrete in a realistic manner. Numerical and physical experiments on concrete cuboids ($120 \times 118 \times 160$ mm), using Ricker wavelets and pencil-lead breaks as AE sources, were carried out to validate TRM for signal-based AE analysis of concrete. A slender RC beam ($120 \times 200 \times 1700$ mm) was subjected to four-point bending. The results confirm that TRM is suitable for studying RC structures and can also be used on large-scale specimens. The influence of cracks on the accuracy of localization is investigated. A parameter- and signal-based analysis is performed. The energy concentrations are spatially imaged using TRM. The accuracy of the TRM results is corroborated by three-dimensional crack distributions that were obtained from X-ray CT images of the tested specimens. Further, TRM is compared to a proved localization method.

In this dissertation it is shown that TRM is suitable to localize AE in both, unreinforced and reinforced concrete. AE sources due to concrete cracking can be localized successfully with TRM, regardless of the presence of previous cracks in the concrete specimen. Using numerical and physical experiments, it is demonstrated that multiple AE sources can be imaged by simply using one set of AE waveforms only.

Kurzfassung

Schallemission (SE) entsteht bei der Freisetzung gespeicherter Dehnungsenergie aufgrund eines irreversiblen Deformationsprozesses oder innerer Reibung. Die freigesetzte Energie manifestiert sich in elastischen Wellen, die sich innerhalb der Struktur ausbreiten. Die emittierten Wellen werden auf der Strukturoberfläche mit piezoelektrischen Sensoren aufgezeichnet und zu akustischen Signalen umgewandelt. Eine häufige Anwendung der SE im Bauingenieurwesen ist die Lokalisierung von Betonrissen und Bewehrungsbrüchen. Bei einem fortgeschrittenen Rissbild aber versagen gängige ankunftszeitbasierte Lokalisierungsverfahren, weil die Wellen die Sensoren entweder mehrfach reflektiert, durch andere Wellen überlagert oder nur mit sehr geringer Stärke erreichen. Aufgrund dessen wird in dieser Dissertation eine neue SE Methode entwickelt, die auf einem anderen physikalischen Prinzip aufbaut als andere existierende Methoden und die die Interferenzen der Wellenfelder ausnutzt.

Die vorliegende Arbeit strebt die Etablierung einer neuartigen auf der Wellenausbreitung basierten Lokalisierungsmethode an, genannt die Zeitumkehr-Modellierung (engl.: Time Reverse Modeling, TRM). Die TRM ist jüngst auf dem Gebiet der Explorationsgeophysik angewendet worden. In dieser Dissertation soll sie in der signalbasierten Schallemissionsanalyse (SEA) am Stahlbeton-Bauteil Einsatz finden. Die TRM nutzt die Signale, welche von den piezoelektrischen Sensoren aufgezeichnet werden, als Eingangsgrößen. Die Signale werden zeitlich umgedreht und numerisch als Quellen wieder in die Struktur eingespeist. In der sogenannten Umkehrsimulation interferieren die Wellenfelder miteinander und werden in deren Ursprung, respektive der SE-Quelle, als eine dominante Energiekonzentration sichtbar. Ein numerisches Betonmodell mit räumlich zufallsverteilten Bestandteilen wurde entwickelt, um das Wellenausbreitungsverhalten von Beton realistisch zu approximieren. Numerische und physikalische Experimente an Betonquadern ($120 \times 118 \times 160$ mm) wurden mit Ricker Wavelets und Bleistiftminenbrüchen als Quellen durchgeführt, um die TRM für die signalbasierte SEA von Beton zu validieren. Ein Vierpunkt-biegeversuch an einem schlanken Stahlbetonbalken ($120 \times 200 \times 1700$ mm) wurde durchgeführt. Es zeigte sich, dass die TRM geeignet ist, um Stahlbeton-Strukturen zu studieren und auf einer grösseren Skala angewendet zu werden. Der Einfluss des Rissbildes auf die Genauigkeit der Lokalisierung wurde studiert. Eine parameter- und signalbasierte SEA wurde durchgeführt. Die Energiekonzentrationen wurden räumlich mit der TRM abgebildet. Die Genauigkeit der TRM-Resultate wurde durch einen Vergleich mit dreidimensionalen Rissverläufen aus Röntgen-CT Bildern der getesteten Körper untermauert. Zusätzlich wurde die TRM einer bewährten Lokalisierungsmethode gegenüber gestellt.

In dieser Dissertation wurde gezeigt, dass die TRM geeignet ist, um SE im unbewehrtem Beton und Stahlbeton zu lokalisieren. SE-Quellen aufgrund von Betonreissen konnten mit der TRM erfolgreich lokalisiert werden, unabhängig vom Rissfortschritt im Betonkörper. Mit numerischen und physikalischen Experimenten wurde gezeigt, dass mehrere SE-Quellen durch lediglich einen Satz aus AE-Wellenformen abgebildet werden können.